

Szczecin 06.09.2018 r.

Dr hab. inż. Karol F. Abramek
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki
Katedra Eksploatacji Pojazdów Samochodowych
70-310 Szczecin, al. Piastów 19
tel. 91 449 48 63



RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Jacka Cabana**

pt.

**„Wpływ parametrów wtrysku paliwa na przebieg procesu rozruchu silnika
o zapłonie samoczynnym”.**

Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie zlecenia Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej Pana prof. dr hab. inż. Zbigniewa Patera WM/304/2018 z dnia 29.06.2018 r.

1. Ocena aktualności wybranego tematu

Rozwój tłokowych silników spalinowych wymuszony jest przez coraz ostrzejsze normy emisji spalin, które wpływają na zastosowane w silnikach różne rozwiązania techniczne i technologiczne. Tłokowy silnik spalinowy o zapłonie samoczynnym nadal jest szeroko stosowany w pojazdach tzw. ciężkiego transportu, maszynach budowlanych, pojazdach użytkowych, wojskowych, ciężarowych, autobusach, ciągnikach rolniczych, statkach morskich, a także i w samochodach osobowych. Mimo wielu głosów, także spotykanych w świecie nauki, mówiących o tym, że silnik spalinowy o zapłonie samoczynnym odchodzi do historii i nie będzie już wykorzystywany do napędu samochodów, wydaje się, że jeszcze przez wiele lat będzie szeroko stosowany. Pomimo wprowadzania na rynki świata pojazdów hybrydowych, elektrycznych oraz coraz częściej obowiązujących

regulacji prawnych i zakazów ograniczających wjazd do centrów wielu miast samochodów wyposażonych w silniki o zapłonie samoczynnym, trudno sobie wyobrazić rozwój gospodarczy różnych państw bez udziału silników o ZS. To przecież wszelkiego typu pojazdy wykorzystywane do transportu rzeczy, ale też i do transportu zbiorowego osób, wyposażone są w silniki ZS, które stanowią dominującą i na dzień dzisiejszy, niezagrażoną pozycję. Obecnie i jeszcze w tej dużo dalszej przyszłości, technologiczny rozwój pojazdów hybrydowych i elektrycznych nie będzie tak zaawansowany, by mógł stanowić zagrożenie dla silników o ZS. Dlatego uważam, że tłokowy silnik spalinowy o zapłonie samoczynnym będzie jeszcze długo stosowany. Natomiast zagadnienia rozruchu silnika o ZS są niezmiernie istotne ze względu na złożoność tego procesu i tzw. łatwość rozruchową silnika, szczególnie w niskich temperaturach otoczenia. Na czas rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym w głównej mierze ma wpływ temperatura w komorze spalania, która zależy od: przebiegu procesu wtrysku, wartości dawki rozruchowej, prędkości obrotowej wału korbowego silnika, rozpylenia paliwa, czasu potrzebnego na odparowanie, zmieszania paliwa z powietrzem, reakcji przed zapłonem, ukształtowania komory spalania, ciśnienia w przestrzeni roboczej, przebiegu procesu spalania, wielkości strat ładunku w postaci przedmuchów gazów do skrzyni korbowej silnika i innych. Dlatego uważam, że zasadne jest prowadzenie badań nad przebiegiem procesu wtrysku oraz spalania w momencie rozruchu silnika.

W recenzowanej rozprawie podjęto aktualny i ważny z praktycznego punktu widzenia problem dotyczący wpływu wybranych parametrów regulacyjnych wtrysku paliwa na przebieg procesu rozruchu i restartu silnika o zapłonie samoczynnym. Zagadnienia te są niezmiernie istotne ze względu na niepowtarzalność cykli pracy silnika w momencie jego rozruchu, aż do chwili uzyskania samodzielnej pracy.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że wybrany temat rozprawy doktorskiej „Wpływ parametrów wtrysku paliwa na przebieg procesu rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym” jest trafny i aktualny, zarówno pod względem naukowym, jak i pod względem możliwości wykorzystania wyników w praktyce. Prezentowana tematyka pracy mieści się w zakresie dyscypliny naukowej **budowa i eksploatacja maszyn**.

2. Przegląd treści i ocena merytoryczna rozprawy

Opiniowana praca doktorska liczy 165 stron z załącznikami (bez załączników 119 stron). Składa się z dziewięciu rozdziałów, zawiera wykaz skrótów i symboli oraz spis literatury (166 pozycji, 82 pozycje w języku angielskim), a także streszczenia w języku polskim i angielskim. Łącznie rozprawa zawiera 117 rysunków w postaci schematów, wykresów i zdjęć oraz 2 tabele (nie licząc załączników). Układ pracy oceniam jako poprawny zarówno co do proporcji poszczególnych części dysertacji, jak i logicznego podziału treści.

W rozdziale pierwszym zatytułowanym „Wstęp” Autor przedstawił wprowadzenie do tematyki pracy oraz zasadność wyboru takiego tematu, opierając się na tym, że ocena procesu rozruchu tłokowych silników spalinowych jest ważną dziedziną badań, a złożoność tego procesu i trudności wynikające z początkiem samodzielnej pracy silnika są ważnym problemem eksploatacyjnym.

W rozdziale drugim zatytułowanym „Podstawowe informacje o procesie rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym” Autor przedstawił zagadnienia teoretyczne dotyczące procesu rozruchu na podstawie przeglądu literatury. Rozdział ten podzielony jest na kilka podrozdziałów. Podrozdział 2.1 „Właściwości rozruchowe silnika o zapłonie samoczynnym” dotyczy opisu czynników konstrukcyjnych, regulacyjnych i eksploatacyjnych na rozruch silnika o ZS. Podrozdział 2.2 „Analiza parametrów rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym” Autor przedstawił parametry rozruchu silnika, do których zaliczył: maksymalne natężenie prądu pobierane przez rozrusznik na początku rozruchu, średnie natężenie prądu podczas uruchamiania silnika, czas trwania pracy rozrusznika pod obciążeniem, czas przyłożenia napięcia na zaciskach rozrusznika, czas rozruchu, temperaturę silnika i temperaturę oleju smarującego na początku rozruchu, prędkość kątową wału korbowego silnika oraz moc rozrusznika. Podrozdział 2.3 „Etapowość rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym” to opis procesu rozruchu składającego się z kilku następujących po sobie etapów.

Rozdział trzeci zatytułowany „Czynniki determinujące prawidłowy rozruch silnika o zapłonie samoczynnym” składa się z kilku podrozdziałów. Podrozdział 3.1 „Wpływ temperatury w procesie rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym” dotyczy analizy teoretycznej wpływu wartości temperatury na rozruch silników o ZS oraz klasyfikacji temperaturowej rozruchów. Podrozdział 3.2 „Wpływ stanu technicznego silnika i osprzętu na

właściwości rozruchowe silnika o zapłonie samoczynnym” dotyczy opisu na podstawie literatury wpływu zużycia wybranych elementów silnika, a na podstawie badań własnych, zużycia rozrusznika na właściwości rozruchowe silnika o zapłonie samoczynnym. W podrozdziale 3.3 „Wpływ rodzaju paliwa na rozruch silnika o zapłonie samoczynnym” Autor analizował wpływ biopaliw wytwarzanych z różnych roślin, tłuszczu pochodzenia zwierzęcego, alkoholi, eterów na właściwości rozruchowe silników. Podrozdział 3.4 „Fizykochemiczne podstawy tworzenia i spalania mieszanki palnej podczas rozruchu” dotyczy fizycznego i chemicznego przygotowania do samozapłonu mieszanki palnej.

W rozdziale czwartym zatytułowanym „Kierunki badań z uwzględnieniem procesu rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym” występują dwa podrozdziały. Podrozdział 4.1 „Wybrane aspekty diagnostyki silnika o zapłonie samoczynnym z wykorzystaniem przebiegu procesu rozruchu”, w którym Autor opisał model pierwszego dziennego rozruchu silnika o ZS, który pozwala na wyznaczenie empirycznej zależności prawdopodobieństwa udanego rozruchu w zależności od czasu jego trwania dla obiektów znajdujących się w dobrym stanie technicznym. Autor zauważył także, że ważnym aspektem diagnostycznym rozruchu jest fakt, że podczas rozruchu ujawnia się największa liczba uszkodzeń układów i elementów silnika. Podrozdział 4.2 „Rozruch silnika spalinowego w technologii Start-Stop” dotyczy teoretycznych aspektów tego systemu.

W rozdziale piątym zatytułowanym „Ocena stanu zagadnienia” Autor próbował przedstawić złożoność procesu i trudności wynikające z początkiem oraz podjęciem samodzielnej pracy przez silnik spalinowy. Z przeprowadzonej analizy zagadnienia rozruchu silnika spalinowego, mimo licznych publikacji dotyczących rozruchu, w dostępnej literaturze występują nieliczne informacje związane z określeniem wpływu parametrów wtrysku na przebieg procesu rozruchu w zależności od istniejących warunków otoczenia. Stąd Autor zajął się tym zagadnieniem oraz podjął badania związane z restartem silnika, istotne w związku z rozwojem technologii Start-Stop.

W rozdziale szóstym zatytułowanym „Cel i zakres pracy” Autor w podrozdziale 6.1 „Cel pracy” za zasadniczy cel pracy uznał ocenę wpływu wybranych parametrów regulacyjnych wtrysku paliwa na przebieg procesu rozruchu i restartu jednocyldrowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym. Za cel poznawczy Autor uznał udowodnienie niepowtarzalności charakteru zachodzenia procesu rozruchu oraz znalezienie

najkorzystniejszych ustaleń wybranych parametrów wtrysku paliwa skracających czas rozruchu dla badanego silnika o ZS. W podrozdziale 6.2 „Teza badawcza” Autor sformułował tezę pracy: „Parametry procesu rozruchu jednocylinowego silnika o zapłonie samoczynnym są zmiennymi losowymi charakteryzującymi się dużym poziomem zmienności, co może prowadzić do nieudanego lub niewłaściwego przebiegu procesu rozruchu”. Autor do tych parametrów rozruchu zaliczył: maksymalny prąd rozruchu, średnią moc rozrusznika, czas rozruchu, pracę rozrusznika, różnicę napięć na akumulatorze przed i po rozruchu, spadek napięcia na akumulatorze rozruchowym. Według Autora właściwości statystyczne parametrów procesu rozruchu istotnie zależą od zadanych wartości kąta wyprzedzenia wtrysku, dawki paliwa oraz ciśnienia otwarcia wtryskiwacza. W podrozdziale 6.3 „Zakres pracy” Autor do realizacji sformułowanych tez wyznaczył następujące zadania badawcze: analiza tematyki badawczej obejmująca rozpoznanie istniejącego stanu wiedzy w dziedzinie procesu rozruchu silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym na podstawie krajowej i światowej literatury, przygotowanie obiektu doświadczalnego, które obejmowało budowę stanowiska badawczego jednocylinowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym z montażem czujników i aparatury pomiarowej, a także przygotowanie i konfiguracja oprogramowania rejestrującego analizowane sygnały pomiarowe, przeprowadzenie badań rozpoznawczych, obejmujących testowanie i kalibrację aparatury kontrolno-pomiarowej, opracowanie programu badań dotyczącego procesu rozruchu silnika, wykonanie badań stanowiskowych dotyczących procesu rozruchu silnika, wykonanie badań stanowiskowych dotyczących procesu restartu silnika, opracowanie i analiza uzyskanych wyników badań oraz końcowa analiza wyników badań oraz sformułowanie wniosków.

W rozdziale siódmym zatytułowanym „Badania stanowiskowe procesu rozruchu jednocylinowego silnika o zapłonie samoczynnym” w podrozdziale 7.1 „Stanowisko i obiekt badań” Autor opisał stanowisko badawcze oraz obiekt badań. Natomiast w podrozdziale 7.2 „Metodyka badań” Autor przedstawił metodykę badań parametrów procesu rozruchu jednocylinowego silnika spalinowego o ZS dla dwóch stanów temperaturowych silnika: 294 ± 3 K (21 ± 3 °C) oraz 334 ± 2 K (61 ± 2 °C). Badania prowadzone były przy ustalonych parametrach wtrysku paliwa (kąt wyprzedzenia wtrysku, ciśnienie wtrysku paliwa oraz dawka paliwa) oraz temperaturze otoczenia. Dla każdej serii badawczej wykonano po 60 prób rozruchowych silnika.

W rozdziale ósmym zatytułowanym „Wyniki badań stanowiskowych” przedstawiono jedynie wybrane wyniki badań stanowiskowych. W podrozdziale 8.1 „Analiza wyników badań rozruchu jednocylindrowego silnika o zapłonie samoczynnym” przedstawiono analizy statystyczne wyników badań stanowiskowych procesu rozruchu silnika. Wyniki badań przedstawiają wartości pomiarów parametrów elektrycznych układu rozruchowego silnika oraz wartości ciśnień uzyskanych w komorze spalania w relacji do wybranych parametrów wtrysku paliwa. W podrozdziale 8.2 „Analiza wyników badań restartu jednocylindrowego silnika o zapłonie samoczynnym” przedstawiono analizy statystyczne wyników badań stanowiskowych procesu restartu jednocylindrowego silnika o zapłonie samoczynnym.

W rozdziale dziewiątym zatytułowanym „Wnioski i uwagi końcowe” Autor na podstawie przedstawionych rozważań obejmujących studium literaturowe oraz analizę badań stanowiskowych procesu rozruchu silnika sformułował wnioski końcowe.

Ogólnie stwierdzam, że przedstawiona analiza literaturowa została przeprowadzona prawidłowo, w sposób przejrzysty i zwięzły, na poziomie potwierdzającym dobre przygotowanie Doktoranta do podjęcia tego problemu naukowego. Rozprawa napisana jest poprawnym językiem, w sposób jasny, logiczny.

Pod względem poziomu naukowego pracę mgr inż. Jacka Cabana oceniam jako poprawną. Przedstawiony problem badawczy jest interesujący poznawczo i ważny ze względu na możliwości zastosowania w praktyce. Główną wartością pracy jest to, że Doktorant zaprojektował i wykonał stanowisko do badań rozruchowych jednocylindrowego silnika o zapłonie samoczynnym, wyposażone w aparaturę kontrolno-pomiarową. Poprawne przygotowanie takiego stanowiska badawczego wymagało konfiguracji oprogramowania rejestrującego analizowane sygnały. Autor wykonał wiele żmudnych badań rozruchowych, które są czasochłonne, ze względu na konieczność stabilizacji temperatury silnika i jego otoczenia. Wszystkie wymienione tutaj elementy pracy stanowią o jej walorach poznawczych i wartości merytorycznej.

3. Uwagi dyskusyjne

Pomimo dołożenia wszelkich starań Autor nie ustrzegł się pewnych błędów, które nasuwają częściowe komentarze i uwagi, które należy przedyskutować:

- Sformułowanie tezy badawczej (str. 50) czyni ją trudną do jednoznacznego udowodnienia lub obalenia bez przyjęcia określonych ustaleń (ustawień) wybranych, innych parametrów np. parametrów wtrysku paliwa (kąt wyprzedzenia wtrysku, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza, dawka wtrysku), temperatury rozruchu (np. określoną temperaturą otoczenia, powietrza, ścianki cylindrowej, oleju smarującego).
- Celem poznawczym pracy było udowodnienie niepowtarzalności charakteru zachodzenia procesu rozruchu dla jednocylindrowego silnika o ZS – pytanie, w jaki sposób oceniał Autor niepowtarzalność procesu rozruchu?
- Autor na str. 51 podał, że w celu udowodnienia postawionych tez opracuje program badań procesu rozruchu silnika spalinowego. Niestety w rozprawie doktorskiej nie znalazłem żadnych informacji odnośnie planowania eksperymentu dotyczącego badań rozruchowych silnika.
- Prowadzenie badań statystycznych w pracach naukowych często sprowadza się do wykonania testu istotności (parametrycznego lub nieparametrycznego). Od prawidłowego wyboru tego testu zależy poprawność i dokładność wnioskowania. Niestety, decyzja wyboru testu nie zawsze jest łatwa do podjęcia i brakuje w rozprawie uzasadnienia zastosowanego przez Doktoranta testu Kruskala-Wallisa.
- Na str. 63 Autor podał, że „Przeprowadzona analiza wyników wykazała, że najlepszymi ustalonymi parametrami wtrysku paliwa z punktu widzenia zajścia procesu rozruchu są...” – co Autor rozumie pod pojęciem „zajście procesu rozruchu”?
- Na str. 67 Autor podał, że „Spadek napięcia na akumulatorze rozruchowym na początku rozruchu jest pośrednią miarą oporów ruchu na początku rozruchu” – czy Autor analizował w jaki sposób zmienia się wartość tarcia w zespole TPC oraz lepkość oleju silnikowego w momencie rozruchu. Ważnym aspektem w rozważaniach rozruchu jest ustalenie mechanizmu oddzielania pierścienia od gładzi tulei cylindrowej pod wpływem oddziaływania hydrodynamicznego oleju smarującego i jego wpływie na tarcie w zespole TPC.
- Na str. 18 Autor podał „... własności i parametry operacyjne”. Powinno być „właściwości”. Własność może być np. prywatna lub państwowa. Natomiast w rozważaniach eksploatacyjnych jest to „właściwość”.

- Na str. 30 ostatni wiersz od dołu Autor podał „...rozruch silnika z niedomaganiem układu zasilania lub układu zapłonowego” – praca doktorska dotyczy silników o zapłonie samoczynnym, skąd więc pojawił się układ zapłonowy?
- Często w rozprawie Autor zapomina o używaniu jednostek układu SI (np. ciśnienie w barach lub temperatura w °C).

4. Wniosek końcowy

Przedstawione wcześniej uwagi nie umniejszają wartości poznawczych i użytkowych pracy. W świetle dokonanej analizy i przedstawionej oceny rozprawy doktorskiej Doktoranta mgr inż. Jacka Cabana nt. „Wpływ parametrów wtrysku paliwa na przebieg procesu rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym”, której opiekunem naukowym jest dr hab. inż. Paweł Drożdżel prof. PL mogę stwierdzić, iż:

- cel pracy został zrealizowany w całości, a postawiona teza udowodniona,
- w prawidłowy i metodyczny sposób przeprowadził proces dowodzenia sformułowanej tezy rozprawy doktorskiej,
- Doktorant wybrał ważną do opracowania i aktualną tematykę rozprawy doktorskiej,
- wykonane badania stanowiskowe procesu rozruchu silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym wykazują znamiona oryginalności rozwiązania problemu naukowego w statystycznym ujęciu pomiarów parametrów elektrycznych układu rozruchowego silnika oraz wartości ciśnienia uzyskanych w komorze spalania w relacji do wybranych parametrów wtrysku paliwa,
- oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego są także badania dotyczące pomiarów zależności zarejestrowanej pierwszej wartości maksymalnego prądu rozruchu w funkcji kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa podczas restartu jednocyldrowego silnika o zapłonie samoczynnym,
- Autor opracował i wykonał stanowisko badawcze, wyposażone w zestaw czujników i aparaturę kontrolno-pomiarową oraz przygotował konfigurację oprogramowania do rejestracji analizowanych sygnałów, stąd widać, że jest przygotowany i posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia badań oraz prac naukowych,

- wykazał się umiejętnością planowania i przeprowadzenia badań eksperymentalnych, naukowych oraz obiektywnością naukową w ocenie statystycznej uzyskanych wyników pomiarów podczas rozruchu silnika,
- przeprowadzona analiza literaturowa potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie **budowa i eksploatacja maszyn**, gdyż analizował szeroki i spójny zakres zagadnień tematycznych procesu rozruchu tłokowego silnika o ZS,
- uzyskał wyniki, które mogą być wykorzystane w innych pracach badawczych i rozwojowych, dzięki temu stworzył podstawy do dalszych badań i ewentualnych zastosowań.

Podsumowując, przedstawiona rozprawa doktorska należy do ważnego obszaru badawczego, związanego z rozruchami tłokowych silników spalinowych o zapłonie samoczynnym. Przeprowadzone badania były czasochłonne i dlatego godna podziwu jest pracowitość Autora oraz determinacja, dzięki której wykonał wartościową pracę eksperymentalną oraz wykazał się dobrą znajomością warsztatu naukowego. Wykonaną pracę oceniam także jako przydatną dla celów praktycznych.

Mgr inż. Jacek Caban opanował na wymaganym do doktoratu poziomie współczesne metody przeprowadzenia badań, umiał właściwie wykorzystać metody statystyczne do oceny wyników pomiarów, służące do rozwiązania złożonego problemu badawczego. Ogólnie koncepcję założoną do rozwiązania przedstawionego problemu badawczego oceniam wysoko. Należy również podkreślić fakt, że uzyskane wyniki pomiarów mają dużą wartość naukową i użyteczną. Doktorant ma opanowany aparat matematyczny w postaci analizy statystycznej. Przeprowadzone badania stanowiskowe oraz sposób ich realizacji świadczą o odpowiednim przygotowaniu Doktoranta do prowadzenia samodzielnej działalności naukowej i badawczej.

Uważam, że przedstawiona do recenzji praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim (zgodnie z ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z późniejszymi zmianami Dz. Ustaw z 2017 r., poz. 1789). Biorąc powyższe pod uwagę **stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Jacka Cabana do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.**

